

# شبیه سازی مونت کارلوی تخریب تابشی پلاستیک های CR-39 در اثر فعالیت رادن و دختران آن در هوا

## خلاصه

محمدرضا رضایی<sup>۱</sup>

علی نگارستانی<sup>۲</sup>

سعید محمدی<sup>۱</sup>

داریوش افضلی<sup>۳</sup>

زمینه و هدف: ماده پلاستیکی CR-39 با فرمول شیمیایی  $C_{10}H_{18}O_7$  علاوه بر کاربردهای مختلف علمی و تحقیقاتی، بهترین گزینه برای عدسی های پزشکی می باشد. رنگ CR-39 در اثر تابش لیزر و فوتون های پر انرژی تغییر می کند. CR-39 به تابش های آلفا نیز بسیار حساس است. در اثر توقف ذرات آلفا ردپاهایی در آن ایجاد می شود. در طول مسیر هر ردپا جنس ماده CR-39 تغییر می کند و سطح آن مورد تخریب قرار می گیرد. هوا حاوی مقداری گاز رادن رادیو اکتیو است که خود آن و دخترانش به گسیل دهنده ذرات آلفا مشهورند. آلفای ناشی از واپاشی رادن و دختران، عملکرد پلاستیک های CR-39 را تحت تأثیر قرار می دهند و ردپاهای بجا مانده باعث تخریب آن می گردند. در این مقاله سعی می شود تا با استفاده از روش مونت کارلو، چگالی ردپاهای تخریبی و عمق تخریب ایجاد شده در پلاستیک های CR-39 در اثر فعالیت رادن و دختران آن شبیه سازی شود.

**روش بررسی:** در این شبیه سازی به داده های توان ایستاندگی آلفا در هوا و CR-39 نیاز داریم که این داده ها از نرم افزار SRIM 2008 استخراج می شوند. رادن موجود در هوا که در حال حرکت است در یک نقطه تصادفی، بصورت تصادفی واپاشی می کند. در نتیجه ذرات آلفایی که به CR-39 می رسند دارای طیف انرژی گسترده ای می باشند. با این شبیه سازی طیف انرژی و زاویه ای ذرات آلفای فرود آمده بر CR-39 بدست آمده است. عمق نفوذ ذره آلفا در CR-39 بستگی به انرژی ذره فرود آمده دارد. با ارائه روشی جدید سعی شده است تا برد ذره آلفا در CR-39 بصورت تابعی از انرژی ذره آلفای فرودی استخراج شود. فعالیت دختران رادن با فعالیت رادن مساوی نیست. نسبت فعالیت دختران به فعالیت رادن (یا ضریب تعادلی) در حالت واقعی در نظر گرفته شده است.

**یافته ها:** ردپاهای ایجاد شده، زاویه های مختلفی دارند ولی در ردپاهای با زاویه ۳۰ درجه بیشترین فراوانی بچشم می خورد. عمق تخریب ایجاد شده در اثر فعالیت روزانه رادن در حدود  $35\mu m$  مشاهده می شود. در عمق  $15-25\mu m$  که چگالی ردپاهای تخریبی افت و خیز کمتری دارد، هر ردپایی در اثر فعالیت روزانه رادن، معادل غلظت  $100\text{Bq/m}^3$  رادن خواهد بود. چگالی ردپاهای تخریبی در این شبیه سازی برابر  $0.142\text{ (Track/cm}^2\text{) / (Bq.d/m}^3\text{)}$  است که منطبق بر نتایج آزمایشی است که توسط Lopez and et al ارائه شده است.

**نتیجه گیری:** تخریب های ایجاد شده در اثر فعالیت رادن و دختران آن بتدریج باعث کدر شدن عدسی، از بین رفتن وضوح تصویر، تغییر ضریب شکست عدسی و در نتیجه پراکندگی نور لیزر در کاربردهای پزشکی پلاستیک های CR-39 می شود.

**واژه های کلیدی:** رادن، مونت کارلو، ذرات آلفا، عمق تخریب پلاستیک های CR-39

<sup>۱</sup>مرکز تخصصی دکتری پیام نور، تهران  
<sup>۲</sup>دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی، کرمان  
<sup>۳</sup>مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان

نویسنده مسئول: محمدرضا رضایی، تلفن: ۰۳۴۶۲۲۸۰۱۸-۰۳۴۶۲۲۸۰  
 ۰۹۱۳۳۴۵۹۳۸  
 پست الکترونیک: mohamadrez45@gmail.com

## مقدمه

است. در طیف آلفای شبیه سازی شده هیچ شباهتی تا انرژی های ۵MeV با طیف اندازه گیری شده مشاهده نمی شود [۴]. در این مقاله سعی بر این است تا با استفاده از روش مونت کارلو این عیب برطرف شود. چگالی رد آلفا در CR-39 در عمق مناسب نیز کمیت مهمی برای محاسبه غلظت رادن است [۵]. عمق مناسب عمقی است که تغییرات چگالی ردپا در واحد طول در آن عمق افت و خیز زیادی نداشته باشد. با رسم چگالی رد در ضخامت های مختلف CR 39 سعی می شود که این عمق مناسب معرفی شود. روش

ماده CR-39 کاربرد زیادی در تمام شاخه های علوم و تکنولوژی دارد و بهترین گزینه برای عدسی های پزشکی می باشند [۱ و ۲]. ماده CR-39 در اثر فعالیت رادن موجود در هوا و تابش لیزر و فوتون های پراثری تخریب و تغییر رنگ می دهد [۳]. مطالعه انرژی و زاویه فرود ذرات آلفای ناشی از فعالیت رادن و دختران آن در هوا بر CR-39 و اطلاعات نفوذ آنها در CR-39 در حالت واقعی یکی از ابزارهای مهم جهت اندازه گیری عمق تخریب پلاستیک های CR-39 می باشد. قبلاً طیف ذرات آلفای رادن و دختران آن اندازه گیری و شبیه سازی شده

$$dx = -\frac{dE}{f(E)} = -g(E)dE \quad (4)$$

$$g(E) = \frac{1}{f(E)}$$

اگر انرژی ذره باردار از مقدار اولیه  $E_0$  به مقدار  $E$  برسد مسافت طی شده توسط آن برابر است با

$$\int_0^x dx = -\int_{E_0}^E g(E)dE$$

$$x = -\int_{E_0}^E g(E)dE \quad (5)$$

برای محاسبه  $x$  ابتدا تابع  $f(E)$  که از SRIM استخراج شده است با استفاده از عمل برازش به دست می آید. معادله برازش شده  $f(E)$  شکلی به صورت زیر دارد [۹]:

$$f(E) = \sum_{i=1}^5 a_i E^{b_i} e^{c_i E} \quad (6)$$

با جای گذاری معادله (6) که با ۱۵ ضریب مشخص می شود در معادله (4)، معادله (5) برای انتگرال گیری بصورت زیر آماده می شود [9]:

$$x = -\int_{E_0}^E \frac{dE}{(\sum_{i=1}^5 a_i E^{b_i} e^{c_i E})} \quad (7)$$

حل این انتگرال مشکل است و باید به صورت عددی حل شود. در شبیه سازی ها، فاصله  $x$  به صورت تصادفی تولید می شود و بازه انرژی  $E_0$  تا صفر به بازه های خیلی کوچکی تقسیم می شود. انرژی  $E_0$  به اندازه بازه تعیین شده کاهش می یابد. میزان  $x$  به دست آمده از انتگرال (7) با عدد تصادفی تولید شده مقایسه می شود، در صورتی که کوچک تر باشد این عمل باید آنقدر تکرار شود تا با آن برابر شود. مقدار  $x$  و  $E$  در این لحظه ثبت می شود. این عمل برای هر ذره آلفا باید تکرار شود. در حالتی که تعداد ذرات پیگیری شده زیاد باشد زمان اجرای برنامه زیاد خواهد شد.

برای به دست آوردن  $E$  به صورت تابعی از  $x$  باید بازه صفر تا برد ذره به بازه های خیلی کوچکی تقسیم شود و اعمالی که در قسمت قبل توضیح داده شد تکرار شود. داده های  $E$  و  $x$  به دست آمده بایستی ترسیم شده و معادله ای بر آنها برازش شود تا رابطه  $E$  به صورت تابعی از  $x$  به دست آید. نمونه ای از کار انجام شده در شکل شماره (۱) نمایش داده شده است.

**معرفی روش جدید محاسبه انرژی ذرات آلفا به صورت تابعی از مسافت طی شده:**

در روش جدید برای محاسبه انرژی ذرات آلفا به صورت تابعی از مسافت طی شده به صورت زیر عمل می شود:

محاسبه برد و انرژی ذرات آلفا در فاصله  $d$  از محل گسیل با استفاده از داده های توان ایستاندگی و با استخراج ضرایب ۱۶ گانه معادله برازش شده بر این داده ها و معرفی کد خاص محاسباتی توسط Nikezic et al ارائه شده است [۶]. در این مقاله سعی شده است تا با معرفی روشی جدید و کارآمد، برد و انرژی ذرات آلفا در فاصله  $d$  از محل گسیل محاسبه شود. در شبیه سازی های انجام شده از اعداد تصادفی با توزیع گوسی برای توصیف ذرات آلفا استفاده شده است [۷]. در این مقاله سعی می شود تا توزیع زاویه ای ذرات فردوی نیز شبیه سازی شود. از نرم افزار 8 Origin pro جهت رسم، برازش و تحلیل داده ها استفاده شده است. جهت شبیه سازی ردپای ذرات آلفا با انرژی مختلف که از فضای اطراف CR 39 در زاویه های مختلف توسط رادن و دختران آن گسیل می شود، به داده های توان ایستاندگی نیاز است. از نرم افزار 2008 SRIM جهت استخراج این داده ها استفاده می شود. این نرم افزار مناسب ترین کد در مقایسه با کدهای ICRU و FLUKA می باشد [۸ و ۹].

## مواد و روش ها

محاسبه برد و انرژی ذرات آلفا در فاصله  $x$  از محل گسیل در هوا انرژی ذرات آلفا در هنگام عبور از محیط کاهش می یابد. توان ایستاندگی ذرات باردار به صورت زیر است [۹].

$$f(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (1)$$

در طول مسیر حرکت، انرژی ذره باردار آنقدر کاهش می یابد تا متوقف شود. رابطه انرژی ذرات آلفا با مسافت طی شده که از رابطه (۱) بدست می آید، بصورت زیر است.

$$dE = -f(E)dx \rightarrow \int_{E_0}^E dE = -\int_0^x f(E)dx \quad (2)$$

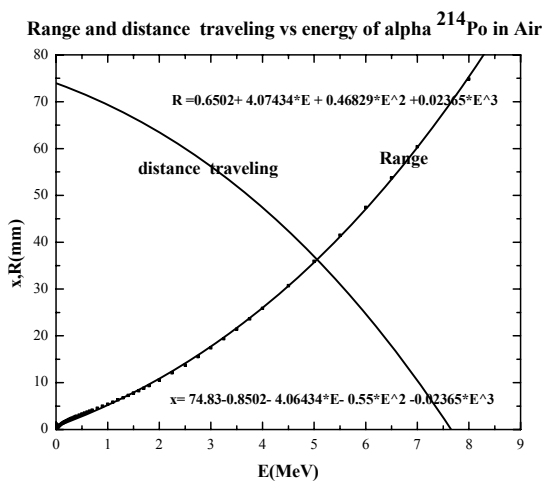
$$E - E_0 = -\int_0^x f(E)dx \rightarrow E = E_0 - \int_0^x f(E)dx \quad (3)$$

در صورتی که رابطه  $f(E)$  به صورت تابعی از  $x$  مشخص باشد رابطه  $E(x)$  بدست خواهد آمد. نرم افزار SRIM2008 توان ایستاندگی را نه صورت تابعی از فاصله بلکه به صورت تابعی از انرژی بیان می کند در نتیجه حل انتگرال (3) به سادگی امکان پذیر نیست. **مروری بر روش قبلی محاسبه انرژی ذرات آلفا در فاصله  $x$  از محل گسیل:**

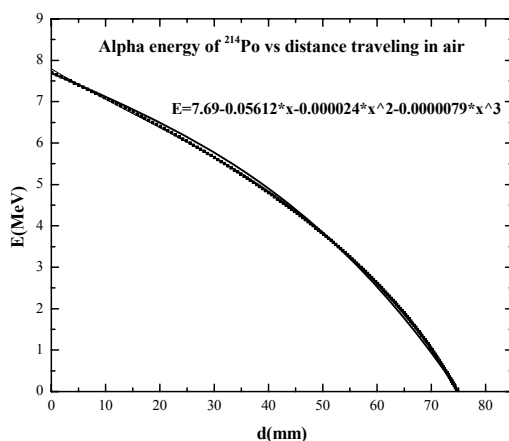
تاکنون برای محاسبه  $f(E)$  به صورت زیر عمل می شده است: با توجه به معادله (1) مسافت طی شده توسط ذره در اثر کاهش انرژی ذره به اندازه  $dx$  برابر است با [۹]:

نمونه‌ای از مراحل طی شده برای استخراج رابطه انرژی ذره آلفا با مسافت طی شده با استفاده از این روش برای ذرات آلفای  $^{214}\text{Po}$  بطور خلاصه بصورت زیر است.

ابتدا داده های برد ذرات آلفای  $^{214}\text{Po}$  با انرژی  $7.69\text{ MeV}$  از SRIM 2008 استخراج می‌شود، را رسم می‌کنیم. سپس معادله ای را بر این داده ها برازش می‌کنیم. معادله برازش شده را در معادله (12) جای گذاری می‌کنیم تا معادله مسافت طی شده با انرژی ذره آلفا بدست آید (شکل شماره ۲). با استخراج وارون این معادله، رابطه انرژی ذره آلفا بصورت تابعی از مسافت بدست خواهد آمد (شکل شماره ۳).



شکل ۲- نمودار برد و مسافت طی شده ذرات آلفای  $^{214}\text{Po}$  با انرژی اولیه  $7.69\text{ MeV}$  بصورت تابعی از انرژی در هوا

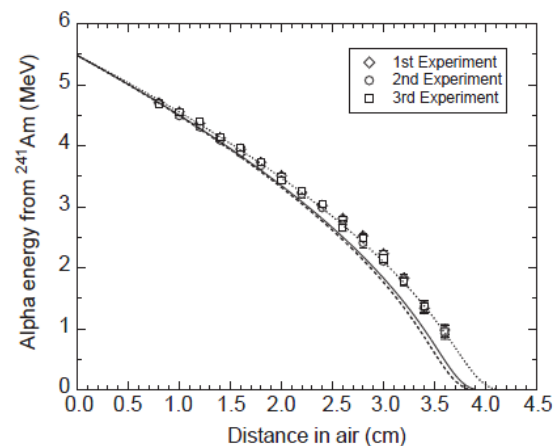


شکل ۳- نمودار انرژی ذرات آلفای  $^{214}\text{Po}$  با انرژی اولیه  $7.69\text{ MeV}$  بصورت تابعی از مسافت طی شده در هوا با استفاده از تکنیک ارائه شده در این مقاله

بتدا با توجه به معادله (5) برد ذرات آلفا به دست می آید.

$$R_0 = \int_0^{E_0} dx = - \int_{E_0}^0 g(E) dE = \int_0^{E_0} g(E) dE \quad (8)$$

برای هر ذره آلفا با انرژی اولیه  $E_0$  رابطه برد ذره با انرژی با استفاده از عمل برازش تابع بر داده های نرم افزار SRIM2008 بدست می آید.



شکل ۴- نمودار انرژی ذرات آلفای چشمه  $^{241}\text{Am}$  با انرژی اولیه  $5.5\text{ MeV}$  بصورت تابعی از مسافت طی شده با استفاده از معادله ۱۵ پارامتری (6) و معادله (7)

$$R = a + bE + cE^2 + dE^3 \quad (9)$$

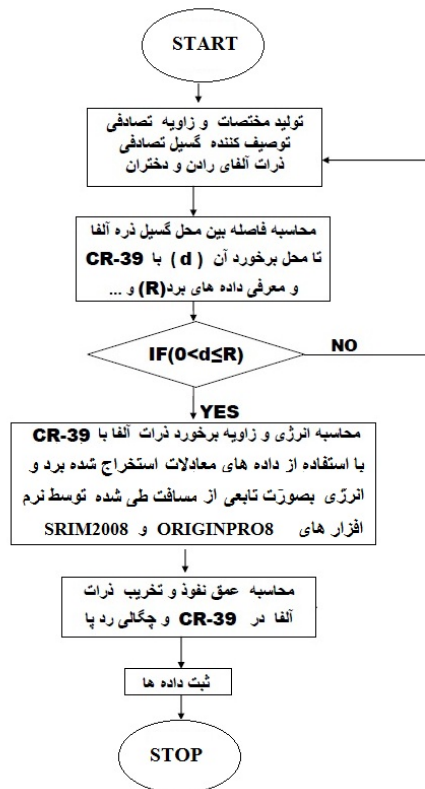
معادله (5) را میتوان بصورت زیر نمایش داد:

$$\begin{aligned} x &= \int_0^x dx = - \int_{E_0}^E g(E) dE = - \left[ \int_{E_0}^0 g(E) dE + \int_0^E g(E) dE \right] \\ &= \int_0^{E_0} g(E) dE - \int_0^E g(E) dE = R_0 - R \end{aligned} \quad (10)$$

که  $R_0$  برد ذره آلفا با انرژی  $E_0$  و  $R$  برد ذره آلفا با انرژی  $E$  است در نتیجه با جایگذاری معادله (9) در معادله (10)، رابطه مسافت طی شده توسط ذره آلفا با انرژی در فاصله  $x$  از محل گسیل بصورت زیر بدست می آید:

$$x = R_0 - R = R_0 - a - bE - cE^2 - dE^3 \quad (12)$$

معکوس این معادله با استفاده از نرم افزار ORIGINPRO8، رابطه انرژی ذره آلفا با مسافت طی شده را بدست می‌دهد. با استفاده از این روش بسادگی می‌توان رابطه انرژی ذره آلفا با مسافت طی شده را بدست آورد.

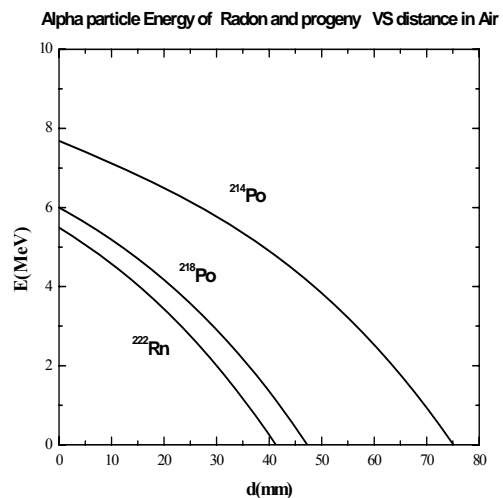


شکل ۵- فلوجارت کدمونت کارلو برای شبیه سازی عمق تخریب پلاستیک های CR-39 در اثر فعالیت رادن و دختران آن در هوا

با تکرار این مراحل برای آلفای  $^{218}\text{Po}$  و  $^{222}\text{Rn}$ ، نمودار انرژی ذرات آلفای رادن و دختران آن با مسافت طی شده برای سه ذره آلفای رادن و دختران در هوا بصورت زیر است (شکل شماره ۴). در نتیجه روابط انرژی ذرات آلفای رادن و دختران آن با مسافت طی شده در هوا با استفاده از این روش بصورت زیر استخراج می شود.

$$E_{214\text{Po}} = 7.69 - 0.05612x - 0.000024x^2 - 0.0000079x^3$$

$$E_{218\text{Po}} = 6 - 0.07312x - 0.00075x^2 - 0.00000821x^3 \quad (13)$$

$$E_{\text{Rn}} = 5.49 - 0.081x - 0.0009333x^2 - 0.000007997x^3$$


شکل ۴- نمودار انرژی ذرات آلفای رادن و دختران بصورت تابعی از فاصله طی شده

عمل می کنیم.

با توجه به شکل شماره ۵، CR-39 مسطحی به ابعاد  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  را در نظر می گیریم و به فاصله برد از آن، اندازه برد آلفا در محیط گسترش می دهیم. چون خارج از این فضا، فاصله ها بزرگتر از برد خواهند شد و هیچ ذره آلفایی به CR-39 نمی رسد. در نتیجه حجم مفید اطراف CR-39 مکعبی به ابعاد  $R(1+2R)(1+2R)$  خواهد بود.

سپس یک نقطه تصادفی داخل فضای فعال ایجاد می کنیم (شکل شماره ۶). از این نقطه ذره آلفایی در یک جهت تصادفی که با دو زاویه تصادفی  $\theta$  و  $\phi$  مشخص می شود، گسیل می شود. سه عدد تصادفی  $Y1, X1, Z1$  را طوری تعیین می کنیم که نقطه  $p$  داخل مکعب باشد. اگر مسیر طی شده توسط ذره آلفا کوچکتر از برد آن در محیط باشد با انرژی کمتر از انرژی اولیه و تحت زاویه  $\theta$  به سطح آشکارساز خواهد رسید. در نتیجه نقطه ثانویه در صورتی که

$$(R \leq Z2, X2 \leq (1+R)) \text{ و } d, y \leq R \quad (14)$$

باشد قابل قبول است.  $d$  فاصله طی شده توسط ذره آلفا و  $R$  برد آن

#### داده های ورودی و نکات کاربردی

ضریب تعادلی (Equilibrium Factor) بین فعالیت رادن و دختران آن برای  $^{218}\text{Po}$  برابر  $0.723$  و برای  $^{214}\text{Po}$  برابر  $0.217$  در نظر گرفته شده است [۱۰]. انرژی ذرات آلفای رادن و دختران بصورت زیر گزارش شده است [۱۱]:

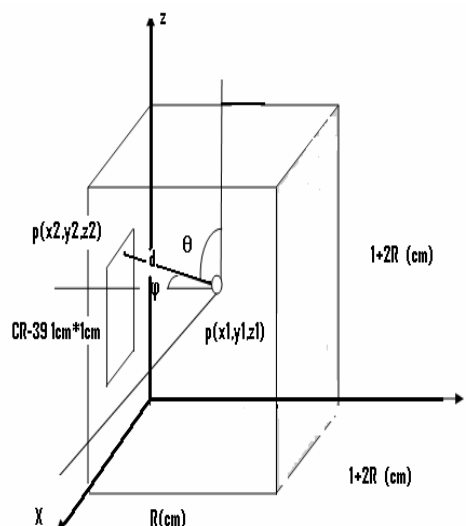
$^{218}\text{Po}$  (7.69MeV) و  $^{214}\text{Po}$  (6.0MeV) ،  $\text{Rn}$  (5.49MeV)

اتم های رادن بصورت یکنواخت و همگن در هوا در حالت متعادل توزیع می شوند. در حالیکه  $^{218}\text{Po}$  و  $^{214}\text{Po}$  به تدریج روی سطوح می نشینند. به علت حرکت آرام دختران رادن برای نشستن روی سطوح می توان توزیع آنها را نیز یکنواخت فرض کرد. تمام ذرات  $^{214}\text{Po}$  و  $^{218}\text{Po}$  از ذرات  $^{218}\text{Po}$  روی سطوح می نشینند. به علت کوتاه بودن طول عمر آنها درصد خیلی زیادی از این مؤلفه ها قبل از نشستن، آلفای خود را گسیل خواهند کرد.

#### شبیه سازی مونت کارلو:

برای شبیه سازی اتفاقاتی که برای ذره آلفا در فضای اطراف CR-39 و داخل آن می افتد طبق فلوجارت ارائه شده زیر (شکل شماره ۵)

است. در صورتیکه شرایط بالا حاکم باشد، حتما ذره ای از هوا به CR-39 خواهد رسید. انرژی فرودی آن با توجه به مقدار  $d$  مشخص می‌شود. زاویه فرودی و محل فرود با مختصات  $(\theta, Z_2, X_2)$  روی CR-39 نیز مشخص است.



شکل ۶- هندسه تخت استفاده شده برای شبیه سازی.

کمیت‌های  $p(x1, y1, z1, \theta)$  بصورت تصادفی تولید می‌شوند. فاصله  $d$  نیز تصادفی خواهد بود. اطراف CR-39 به اندازه برد ذره آلفا ( $R$ ) گسترش داده شده است.

برای یک روز فعالیت رادن تعداد ذرات آلفایی که باید ردیابی شوند بصورت زیر بدست می‌آید:

غلظت رادن در محیط ( $C$ ) بر حسب  $Bq/m^3$  است. بکرل ( $Bq$ ) واحد فعالیت است که برابر یک واپاشی در ثانیه می‌باشد. در نتیجه تعداد ذرات آلفایی که باید در زمان  $t(s)$  در حجم  $V(m^3)$  ردیابی شوند برابر است با  $N=C(Bq/m^3) \times t(s) \times V(m^3)$  بعلاوه اینکه نصف ذرات آلفا بطرف CR-39 و نصف دیگر برعکس گسیل می‌شوند مقدار  $N$  بایستی در ضریب  $0.5$  ضرب شود. برای فعالیت روزانه رادن  $t=86400s$  خواهد بود. حجم مفید اطراف CR-39 را با توجه به شکل شماره ۶ با  $V=R \times (1+2R)^2$  نشان می‌دهیم. در این رابطه  $R$  برد ذرات آلفای  $^{214}Po$  و  $^{218}Po$ ،  $^{222}Rn$  بر حسب متر است. بنابراین تعداد ذرات آلفای رادن قابل ردیابی در یکروز برابر است با:

$$N=0.5 \times C(Bq/m^3) \times 86400(s) \times R \times (1+2R)^2(m^3) \quad (15)$$

در حالت تعادل فعالیت رادن و دختران آن یکسان نیست. ضریب تعادلی  $F$  رابطه فعالیت رادن و دختران آن را مشخص می‌کند. ضریب تعادلی نسبت فعالیت دختران رادن به فعالیت رادن است. بنابراین تعداد ذرات آلفای دختران رادن قابل ردیابی از حاصل ضرب ضریب تعادلی  $F$  در معادله (15) بدست می‌آید.

$$N=0.5 \times C(Bq/m^3) \times 86400(s) \times R \times (1+2R)^2(m^3) \times F \quad (16)$$

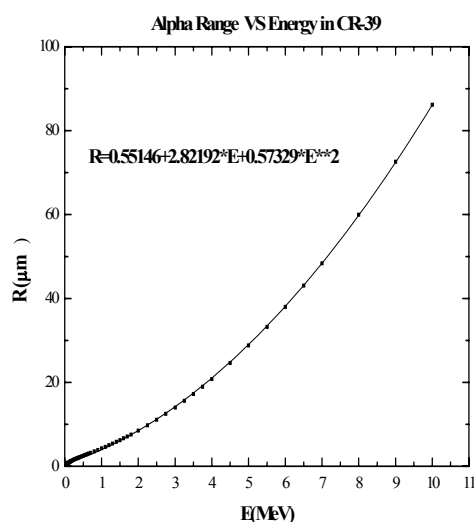
برای مشخص شدن عمق نفوذ و ردیابی بجا مانده در CR-39 باید مراعاتی که برای ذرات آلفا در هوا انجام شده است را عیناً تکرار کرد. تفاوت بررسی آن با هوا در این است که انرژی اولیه ذرات آلفای گسیل شده در هوا ثابت است ولی ذراتی که به CR-39 می‌رسند انرژی‌های مختلفی دارند. با رسم داده‌های استخراج شده توان ایستاندگی برای CR-39 با فرمول شیمیایی  $C_{10}H_{18}O_7$ ، برد ذرات آلفا تا انرژی  $10MeV$  استخراج می‌شود. برد ذره آلفا بصورت تابعی از انرژی در CR-39 بصورت زیر رسم شده است (شکل ۷).

$$R = 0.55146 + 2.82192 \times E + 0.57329 \times E^2 \quad (17)$$

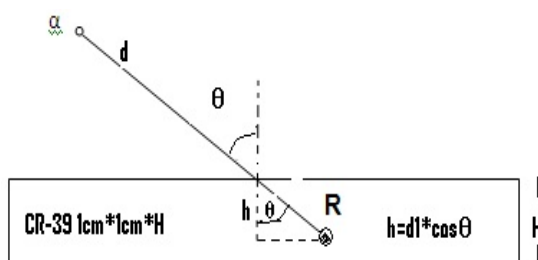
بعلاوه مشخص بودن زاویه برخورد، عمق نفوذ ذره در CR-39 نیز قابل محاسبه است (شکل ۸).

$$h=R \cos \theta \quad (18)$$

برای محاسبه عمق نفوذ ذرات آلفا در CR-39 از انرژی و زاویه برخورد در معادلات (۱۷) و (۱۸) جایگزین می‌شود.



شکل ۷- برد ذره آلفا بصورت تابعی از انرژی در CR-39



شکل ۸- عمق نفوذ ذره در CR-39

## داده ها و نتایج بدست آمده

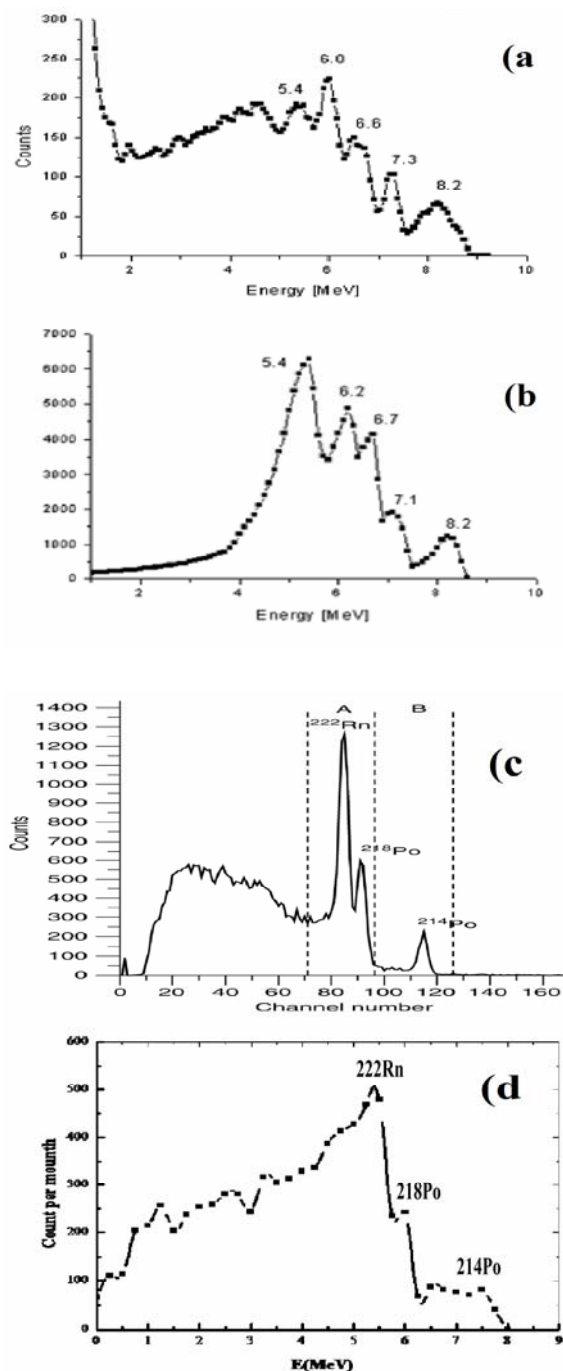
## نتایج حاصل از شبیه سازی

کدمونت کارلوی نوشته شده، انرژی ذرات آلفایی که به آشکارساز CR-39 به ابعاد  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  در اثر فعالیت  $1\text{KBq/m}^3$  رادن و دختران می رسد را ارائه می دهد. فراوانی این داده ها را در انرژی های مختلف و در بازه های کوچک انرژی بدست می آوریم. نتیجه این عمل طیف انرژی ذرات آلفای رادن و دختران آن است (شکل شماره ۹د). شکل شماره ۹ا) طیف عملی ذرات آلفای رادن (Rn)، دختران  $(^{218}\text{Po}, ^{214}\text{Po})$  و تورن  $(^{220}\text{Rn})$  به دست آمده توسط J. Rickards را نشان می دهد [۴]. طیف شبیه سازی شده توسط J. Rickards (شکل شماره ۹ب)، تا انرژی  $5\text{MeV}$ ، با طیف عملی (شکل شماره ۹ا) همخوانی ندارد. طیف شبیه سازی شده در این مقاله (شکل شماره ۹د) تا انرژی  $5\text{MeV}$ ، تطابق بیشتری با شکل شماره ۹ا) نسبت به شکل شماره ۹ب) دارد.

شکل شماره ۹c) طیف عملی ذرات آلفای رادن و دختران آن که توسط A. Vargas and et al بدست آمده است را نشان می دهد [۴]. در انرژی های بیشتر از  $5\text{MeV}$  نیز طیف شبیه سازی شده در این مقاله با طیف شکل شماره ۹c) همخوانی خوبی دارد. بنابراین طیف شبیه سازی شده تا انرژی  $5\text{MeV}$  تقریباً منطبق بر طیف عملی J. Rickards و بیشتر از  $5\text{MeV}$  تقریباً منطبق بر طیف عملی A. Vargas است. در طیف عملی J. Rickards افزایش فراوانی در انرژی های خیلی کم ناشی از آشکارسازی ذرات بتای ناشی از فعالیت رادن و دختران، توسط آشکارساز می باشد که با حذف آنها مشکل تطابق طیف شبیه سازی شده در این مقاله با طیف عملی در انرژی های کم برطرف می شود. با مقایسه شکل های شماره ۹ا) و ۹c) مشاهده می شود که شکل طیف عملی به نوع آشکارساز بکارگرفته شده نیز بستگی دارد.

حجم مؤثر اطراف آشکار ساز در شکل شماره ۱۰ آمده است. با توجه به یکسان نبودن برد ذرات آلفای رادن و دختران آن، حجم مؤثر اطراف آشکار ساز به سه ناحیه تقسیم می شود. ناحیه فعالیت  $^{214}\text{Po}$  (ناحیه ۱)، ناحیه فعالیت  $^{218}\text{Po}$  (ناحیه ۲) و ناحیه فعالیت  $^{222}\text{Rn}$  (ناحیه ۳). آلفای ناشی از فعالیت  $^{214}\text{Po}$  خارج از فضای ناحیه ۱، آلفای ناشی از فعالیت  $^{218}\text{Po}$  خارج از فضای ناحیه ۲ و آلفای ناشی از فعالیت  $^{222}\text{Rn}$  خارج از فضای ناحیه ۳ نمی رسند.

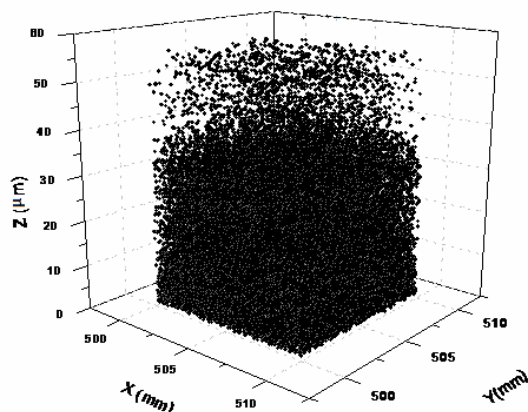
این نواحی شبیه به بیضیگون است. تصاویر دوبعدی ناحیه فعال اطراف CR-39 نیز این امر را تأیید می کند [۷]. قبلاً توزیع زاویه ای اعداد تصادفی برای توصیف ذرات آلفا نشان داده شده است [۱۲]. سعی می شود تا توزیع زاویه ای ذرات فردوی نیز ارائه شود. نمودار فراوانی برحسب زاویه فردوی برای دختران رادن نشان می دهد که فراوانی ذرات آلفای  $^{218}\text{Po}$  با زاویه کمتر از  $5$  درجه بیشترین مقدار و



شکل ۹- طیف ذرات آلفای رادن و دختران آن: (a) طیف عملی ذرات آلفای رادن (Rn)، دختران  $(^{218}\text{Po}, ^{214}\text{Po})$  و تورن  $(^{220}\text{Rn})$  به دست آمده توسط J. Rickards [۴]  
(b) طیف شبیه سازی شده ذرات آلفای رادن (Rn)، دختران  $(^{218}\text{Po}, ^{214}\text{Po})$  و تورن  $(^{220}\text{Rn})$  [۴]  
(c) طیف عملی ذرات آلفای رادن و دختران آن که توسط Vargas and A. et al [۲۴]  
(d) طیف شبیه سازی شده ذرات آلفای رادن و دختران آن در این مقاله



۱۰ درجه بیشترین فراوانی مشاهده می‌شود. میزان نفوذ و تخریب ذرات آلفای ناشی از فعالیت  $415 \text{ KBq/m}^3$  رادن و دختران آن در CR-39 به ابعاد  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  به مدت ۱ روز به صورت زیر شبیه سازی شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- میزان نفوذ و تخریب ذرات آلفای رادن و دختران آن در R-39 (محور Z)

با توجه به شکل شماره ۱۲ نتایج زیر حاصل می‌شود:

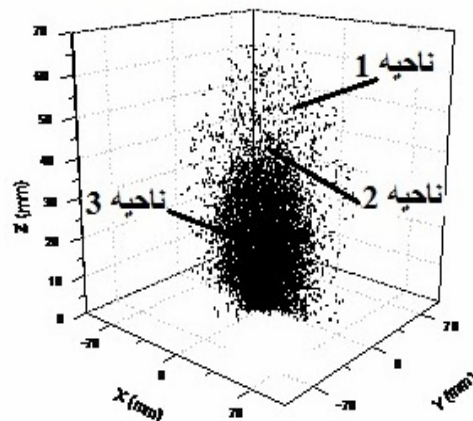
- ۱- درصد کمی از ذرات آلفا عمق نفوذ زیادی دارند (بین  $35 \mu\text{m}$  تا  $55 \mu\text{m}$ ).
- ۲- بیشترین تخریب CR-39 تا عمق  $35 \mu\text{m}$  انجام می‌پذیرد. اطلاعات بیشتری از زاویه فرودی و عمق نفوذ ذرات آلفا داخل CR-39 در جدول شماره ۱ آورده شده است.
- جدول شماره ۱ نشان می‌دهد که عمق نفوذ آلفای  $^{214}\text{Po}$  در CR-39 بین  $7 \mu\text{m}$  تا  $51 \mu\text{m}$  در نوسان است. با توجه به شکل (۷b) بیشترین فراوانی  $^{214}\text{Po}$  مربوط به بازه زاویه‌ای  $40^\circ$  -  $10^\circ$  درجه است. در نتیجه با توجه به جدول شماره ۱، ردپاهای مشاهده شده در عمق  $7$  -  $12 \mu\text{m}$  و با زاویه‌های  $40^\circ$  -  $10^\circ$  درجه مربوط به آلفای  $^{214}\text{Po}$  خواهند بود.

ذرات آلفای  $^{218}\text{Po}$  بیشتر در زاویه‌های  $55^\circ$  -  $15^\circ$  و  $5^\circ$  -  $0^\circ$  درجه با عمق نفوذ  $25$  -  $52 \mu\text{m}$  نفوذ می‌کنند. همچنین ذرات آلفای  $^{222}\text{Rn}$  دارای عمق نفوذ  $20$  -  $0^\circ$  و زاویه  $60^\circ$  -  $0^\circ$  قرار دارند. با توجه به شکل شماره ۱۱ بیشترین فراوانی آلفای  $^{218}\text{Po}$  مربوط به بازه زاویه‌ای  $5^\circ$  -  $0^\circ$  درجه است. در نتیجه با توجه به جدول شماره ۱، ردپاهای مشاهده شده در عمق  $32$  -  $52 \mu\text{m}$  و با زاویه‌های  $5^\circ$  -  $0^\circ$  درجه مربوط به آلفای  $^{218}\text{Po}$  خواهند بود.

با توجه به شکل شماره ۱۱ بیشترین فراوانی ذرات آلفای  $^{222}\text{Rn}$  در بازه زاویه‌ای  $50^\circ$  -  $30^\circ$  درجه است. در نتیجه با توجه به جدول شماره ۱، ردپاهای مشاهده شده در عمق  $42$  -  $49 \mu\text{m}$  و با زاویه‌های  $50^\circ$  -  $30^\circ$  درجه مربوط به آلفای  $^{222}\text{Rn}$  خواهند بود.

زاویه  $65^\circ$  درجه کمترین مقدار را به خود اختصاص داده اند. فراوانی

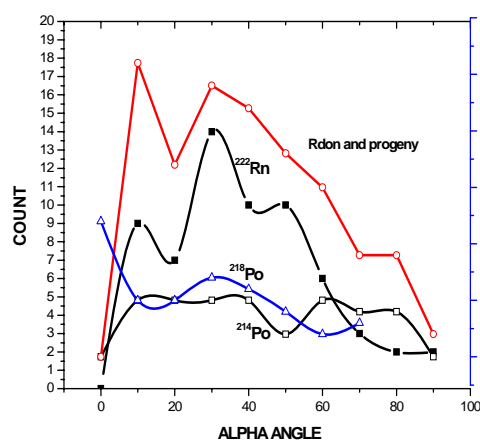
Effective volume around 10mm\*10mm CR-39



شکل ۱۰- حجم مؤثر اطراف CR-39 موجود در صفحه  $Z=0$

ذرات آلفا  $^{214}\text{Po}$  بین  $40^\circ$  -  $10^\circ$  درجه ثابت می‌ماند ولی بین  $60^\circ$  -  $40^\circ$  درجه افت زیادی پیدا می‌کند. در زاویه  $50^\circ$  درجه کمترین فراوانی به چشم می‌خورد. آلفای رادن بیشترین فراوانی شان در زاویه فردوی  $10^\circ$  درجه است و فراوانی، تقریباً بصورت یکنواخت با افزایش زاویه فرودی کاهش می‌یابد. با استفاده از ابزارهای نوری توزیع زاویه ای بین  $40^\circ$  -  $80^\circ$  درجه ذرات آلفا تا انرژی  $4.5 \text{ MeV}$  بررسی شده است که رفتاری مشابه نتایج فوق دارد [۱۳]. تعداد ردهای ذره آلفای رادن و «رادن و دختران» در زاویه‌های مختلف نیز بصورت زیر است (شکل شماره ۱۱).

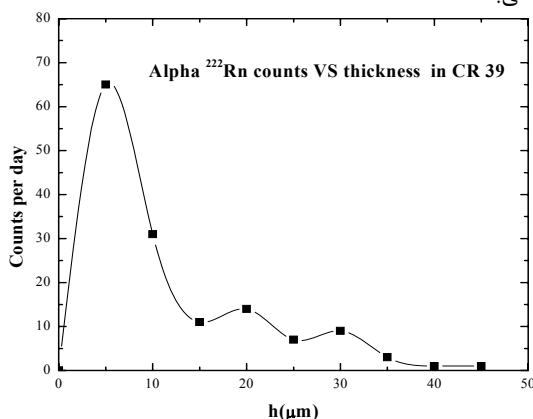
برای رادن، ردپاهای با زاویه  $30^\circ$  درجه بیشترین فراوانی را به خود نسبت داده‌اند. در مجموع برای رادن و دختران در ردهای با زاویه



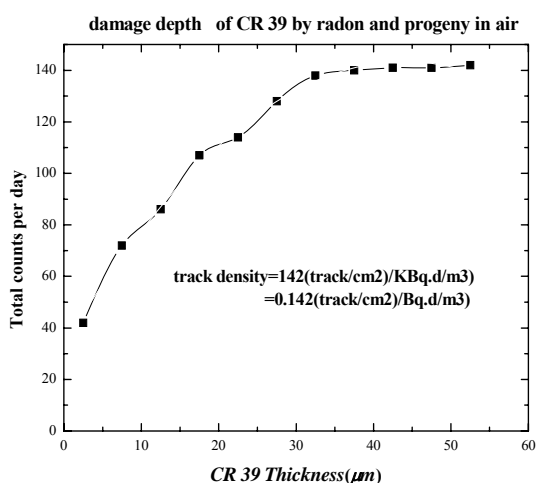
شکل ۱۱- تعداد ردهای ذره آلفای رادن و دختران در زاویه های مختلف

اگر هدف بررسی عمق تخریب ذرات آلفا باشد شکل زیر نشان می دهد که عمق تخریب مناسب در حدود  $25 \mu\text{m}$  است (شکل شماره ۱۴). در این عمق با توجه به شکل شماره (۱۳) همه ذرات آلفا نقش دارند و در تمام زاویه ها فرود می آیند. در نتیجه تا عمق  $25 \mu\text{m}$  اگر لایه برداری یا خورش شیمیایی صورت گیرد هر ردپایی نشانگر غلظت  $100 \text{ Bq/m}^3$  برای رادن است. با توجه به شکل شماره ۱۳ و جدول شماره ۲، در حدود ۷۰٪ تخریب ها تا عمق  $15 \mu\text{m}$  نفوذ می کنند و توزیع زاویه ای یکنواختی دارند.

با توجه به شکل شماره ۱۴ چگالی ردهای تخریبی ذرات آلفا در CR-39 برابر  $(\text{Track/cm}^2)/(\text{Bq.d/m}^3)$  ۰/۱۴۲ استخراج می شود که کمتر از حد بالای چگالی شمارش ذرات آلفا برای رادن و دختران آن که برابر  $(\text{Track/cm}^2)/(\text{Bq.d/m}^3)$  ۰/۳۳۲ گزارش شده [۱۳] و منطبق بر نتایج آزمایشی  $(\text{Track/cm}^2)/(\text{Bq.d/m}^3)$  ۰/۱۶۸ می باشد [۱۶].



شکل ۱۳ - حداکثر عمق تخریب CR-39



شکل ۱۴ - عمق تخریب روزانه پلاستیک CR-39 در اثر ذرات آلفای رادن و دختران

در حالت کلی با توجه به جدول شماره ۱، ردپاهای با زاویه ۳۵-۵۶ درجه و عمق نفوذ  $49-56 \mu\text{m}$ ، قطعاً مربوط به فعالیت آلفای  $^{214}\text{Po}$  می باشند. چون بازه انرژی  $6/4-7/4 \text{ MeV}$  مربوط به این عمق، نمی تواند ناشی از فعالیت آلفای  $^{218}\text{Po}$  با انرژی  $6 \text{ MeV}$  و آلفای  $^{222}\text{Rn}$  با انرژی  $5/49 \text{ MeV}$  باشد.

#### جدول ۱- اطلاعات ذرات آلفا داخل CR-39 بصورت تابعی از زاویه

##### فرودی و عمق نفوذ

| ذرات آلفای رادن و دختران     |       |         |         |         |
|------------------------------|-------|---------|---------|---------|
| زاویه فرودی (درجه)           | ۰-۸۰  | ۳-۸۰    | ۵-۸۰    | ۳۵-۶۵   |
| عمق نفوذ ( $\mu\text{m}$ )   | ۰-۲۸  | ۲۸-۴۲   | ۴۲-۴۹   | ۴۹-۵۶   |
| انرژی (MeV)                  | ۰-۳/۷ | ۳/۷-۵/۵ | ۵/۵-۶/۴ | ۶/۴-۷/۴ |
| ذرات آلفای $^{222}\text{Rn}$ |       |         |         |         |
| زاویه فرودی (درجه)           | ۲-۱۸  | ۳۰-۵۰   | ۲۰-۳۰   | ۷۵-۸۰   |
| عمق نفوذ ( $\mu\text{m}$ )   | ۲۵-۳۰ | ۴۲-۴۹   | ۳۰-۳۸   | ۲۸-۴۲   |
| ذرات آلفای $^{214}\text{Po}$ |       |         |         |         |
| زاویه فرودی (درجه)           | ۰-۶۰  | ۲۵-۵۵   | ۳۰-۵۰   | ۷۰-۷۵   |
| عمق نفوذ ( $\mu\text{m}$ )   | ۷-۱۲  | ۱۸-۲۵   | ۴۹-۵۱   | ۲۴-۴۴   |
| ذرات آلفای $^{218}\text{Po}$ |       |         |         |         |
| زاویه فرودی (درجه)           | ۳۰-۶۰ | ۳-۳۰    | ۳۰-۵۰   | ۵۰-۷۰   |
| عمق نفوذ ( $\mu\text{m}$ )   | ۲۵-۳۵ | ۳۲-۵۲   | ۵۱-۵۵   | ۱۴-۴۵   |

نتایج شبیه سازی شده شمارش رد ذرات آلفا در CR-39 ناشی از فعالیت رادن و دختران نشان می دهد که حداکثر عمق نفوذ حدود  $40 \mu\text{m}$  است. این مقدار برای هندسه استوانه ای در حدود  $40 \mu\text{m}$  گزارش شده است [۱۴]. حساسیت برای لایه  $25 \mu\text{m}$  زیاد است [۱۵]. با توجه به شکل شماره ۱۳ بهترین ضخامت برای لایه برداری در عمق های بین  $15 \mu\text{m}$  تا  $25 \mu\text{m}$  است. علت این است که تغییرات رد در این بازه خیلی کمتر از بازه  $10-0 \mu\text{m}$  است (جدول شماره ۲).

#### جدول ۲- تغییرات رد در واحد طول در بازه های مختلف

| بازه $\mu\text{m}$ | $\kappa = \left  \frac{d\rho}{dx} \right _{x=\frac{r}{\cos\theta}} / (\text{KBq.d/m}^3)$ |
|--------------------|--|
| 0-5                | 13   |
| 5-10               | ۱۱   |
| 15-20              | 1.5  |
| 20-25              | 2  |

در این جدول  $\kappa = \left| \frac{d\rho}{dx} \right|_{x=\frac{r}{\cos\theta}}$  تغییرات رد در واحد طول که کمیتی مناسب برای تعیین ضریب کالیبراسیون و ( $\theta$ ) چگالی رد ذرات آلفا است.

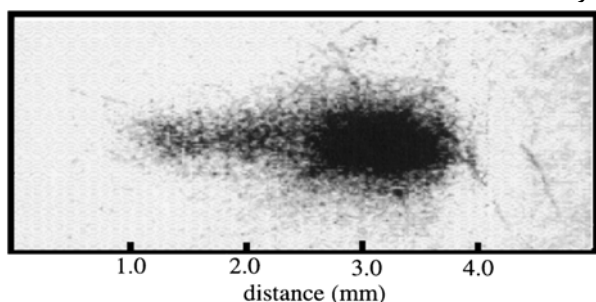


## بحث

عمق نفوذ، تعداد و زاویه ردپاهای ایجاد شده ذرات آلفا در پلاستیک‌های CR-39 نیز پارامترهای مهمی در مطالعه تخریب ناشی از فعالیت رادن و دختران آن می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، طیف انرژی ذرات آلفای ناشی از فعالیت رادن و دختران شبیه سازی شده است که با طیف اندازه‌گیری شده مطابقت دارد.



شکل ۱۳- میکروکانال‌های ایجاد شده در اثر برهمکنش لیزر هلیوم- نئون با CR-39 [۲۲]

برد ذرات آلفا بصورت تابعی از انرژی در پلاستیک‌های CR-39 نیز با یک روش ابتکاری محاسبه گردیده است. در نهایت چگالی ردپا، عمق تخریب، توزیع زاویه‌ای ردپاهای ذرات آلفای ناشی از فعالیت رادن و دختران آن بدست آمده است. چگالی ردپاهای تخریبی ذرات آلفا در CR-39 برابر  $0.142 \text{ (Track/cm}^2\text{)/(Bq.d/m}^3\text{)}$  استخراج می‌شود. حداکثر عمق تخریب در حدود  $35 \mu\text{m}$  است. در حدود  $70\%$  تخریب‌ها تا عمق  $15 \mu\text{m}$  نفوذ می‌کنند و توزیع زاویه‌ای یکنواختی دارند. در نتیجه تخریب‌های ایجاد شده باعث کدر شدن و تغییر ضریب شکست پلاستیک می‌شوند که نتیجه آن از بین رفتن وضوح تصویر و پراکندگی نور لیزر در کاربردهای پزشکی پلاستیک‌های CR-39 می‌شوند. بعلت اینکه رادن در آب و مایعات دیگر قابل حل است در آینده میتوان تخریب ایجاد شده در پلاستیک‌های پلاستیکی توسط رادن محلول در این مایعات را نیز بررسی کرد.

هدف از مطالعه حاضر شبیه سازی عمق تخریب پلاستیک‌های CR-39 در اثر فعالیت رادن و دختران آن در هوا است. با توجه به اینکه پلاستیک‌های CR-39 بطور گسترده ای در پزشکی و ابزارهای نوری جهت تصویربرداری و لیزر درمانی استفاده می‌شود تاکنون تخریب و تغییر رنگ این پلاستیک‌ها که می‌تواند تشکیل تصویر و عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهد بصورت واقعی شبیه سازی نشده است. بعلت اینکه از CR-39 بطور گسترده ای برای اندازه‌گیری رادن با توجه به ردهایی که ذرات آلفای ناشی از فعالیت آنها بجا می‌گذارد استفاده می‌شود حدس می‌زنیم که ممکن است که رادن موجود در هوا نیز ردهایی در پلاستیک‌های CR-39 بجا بگذارد. تمام شبیه‌سازی‌هایی که روی CR-39 انجام شده است به نحوه خورش شیمیایی ردهای ایجاد شده می‌پردازد ولی نحوه فرود و نفوذ ذرات آلفای ناشی از فعالیت رادن و دختران آنها در CR-39 در حالت واقعی شبیه سازی نشده است. علت واقعی نبودن شبیه سازی‌های قبلی مشابه نبودن طیف ذرات آلفای اندازه‌گیری شده و طیف ذرات آلفای شبیه سازی شده است [۴]. برای شبیه سازی در حالت واقعی باید اطلاعات کاملی از نحوه فعالیت رادن و ضریب تعادلی بین رادن و دختران [۱۰] مشخص باشد. آلفای ارسال شده توسط رادن و دختران کاملاً تصادفی است. با تولید اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت میتوان زاویه و مکان تصادفی تولید کرد. توزیع حاکم بر فعالیت رادن توزیع یکنواخت است. ردهای بجا مانده در پلاستیک CR-39 بعلت تغییر ماده در طول رد ایجاد شده توسط ذرات آلفا توسط میکروسکوپ قابل مشاهده است. این ردپاها مسیر نور مرئی و نور لیزر را به علت تغییر ضریب شکست CR-39 در محل ردپا تغییر می‌دهد [۱۷]. بنظر می‌رسد که بعلت زیاد بودن چگالی ردپاها در سطح پلاستیک نسبت به عمق آن، ضریب شکست نور در نقاط مختلف سطح و عمق پلاستیک ثابت نیست و میکروکانال‌های ایجاد شده در اثر فعالیت رادن و تابش لیزر وضوح تصاویر را به هم میریزد و باعث پراکندگی نور لیزر می‌گردند [۱۸، ۱۹ و ۲۰] و زنگ خطری برای کاربردهای دقیق پلاستیک‌های CR-39 محسوب می‌شوند [۲۱، ۲۲ و ۲۳] (شکل شماره ۱۳).

## منابع

1. Fazal-ur- Rehman. Experimental and Monte Carlo simulation studies of open cylindrical radon monitoring device using CR-39 detector. J. Environ Radioactivity 2003; 65: 243–54.
2. Peter G, Shaw-McMinn OD. Apply the medical model to rescribing spectacle lenses. Southern California College of Optometry.
3. Shahid S. Effect of CO2 laser irradiation on the track registration properties of CR-39. 31st EPS Conference on Plasma Phys 2004; 28:5.045.
4. Rickards J. A Monte Carlo study of radon detection in cylindrical diffusion chambers. Journal of Environmental Radioactivity 2010; 101: 333–7.

5. Tokonami S, Sun Q, Akiba S, Zhuo W, Furukawa M, Ishikawa T, Hou C, Zhang S, Narazaki Y, Ohji B, Yonehara H, Yamada Y. Radon and Thoron Exposures for Cave Residents in Shanxi and Shaanxi Provinces. *Radiat Res* 2004; 162: 390–6.
6. Nikezic D. Absorbed dose delivered by alpha particles calculated in cylindrical geometry. *J Environ Radioactivity* 2002; 60:293–305.
7. Nikezic D, Yu K.N. Computer simulation of radon measurements with nuclear track detectors. ISBN 978-160021-595-7.
8. Paul H. A comparison of recent stopping power tables for light and medium-heavy ions with experimental data. *Nucl Instr and Meth in Phys Res B* 2006; 247: 166–72.n
9. Yu K.N. Comparison among alpha-particle energy losses in air obtained from data of SRIM, ICRU and experiments. *Applied Radiation and Isotopes* 2003; 59: 363–6.
10. Nikezic' D, Yu K.N. LR115 detector response to  $^{222}\text{Rn}$  in the presence of  $^{220}\text{Rn}$ . *Health Physics* April 2000; 78: 4.
11. Banjanac R, et al. Indoor radon measurement by nuclear track detector. *Phy chem and tech* 2006 14(1): 93-100.
12. Nikezic D, Yu K.N. Incidence characteristics of alpha particles on detectors irradiated in a radon progeny atmosphere. *Nucl Instr and Meth in Phys Res B* 187 (2002) 492–498?
13. Law Y.L. Optical appearance of alpha-particle tracks in CR-39 SSNTDs.
14. Sima O. Monte Carlo simulation of radon SSNT detectors. *Radiation Measurements* 2001; 34: 181–6.
15. Vip wai yi. Retrospective radon progeny dosimetry. phd.thesis city university of hong kong Radiation Measurements 2008; 43: S128- 31.
16. López F.O, Canoba A.C. Passive Method for the Equilibrium Factor Determination between  $^{222}\text{Rn}$  Gas and its Short Period Progeny. 11th International Congress on the International Radiation Protection Association, Madrid España 2004; 23-28.
17. El-Ghandoor H, El-Fiki S. A, El-Zaiat S. Y. Interferometric investigation of the effect of gamma radiation on the refractive index of CR-39 polymer. *Optics & Laser Technology* 1996; 28(8): 585-7.
18. Fleischer R.L, Meyer N.R, Hadley S.A, MacDonald J, Cavallo A. Personal Radon Dosimetry from Eyeglass Lenses. *Radiat Prot Dosimetry* 2001; 97(3): 251-8.
19. Groetz J. E, Lacourt A, Meyer P, Fromm M, Chambaudet A, Potter J. A. New Method for Reading CR-39 by Using Coherent Light Scattering. *Radiat Prot Dosim* 1999; 85(1–4): 447–50.
20. Platzer H, Abmayr W, Paretzke H.G. Evaluation of Dielectric Track Detectors with Diffracted Laser Light. *Atomkernergie* 1972; 20: 162.
21. Moore M. E, Gepford H. J, Hermes R. E, Hertel N. E, Devine R. T. Laser illuminated etched track scattering (LITES) dosimetry system. *Radiation Protection Dosimetry* 2002; 101(1–4): 43-5.
22. Krushelnick K, Clark E. L. Multi-MeV Ion Production from High-Intensity laser Interactions with Underdense Plasmas. *Imperial College of Science, Technology & Medicine* 1999; 83(4):?.
23. Abu-Jarad, Durrani S.M.A, Islam M.A. Effect of 10.6  $\mu\text{m}$  pulsed laser on the CR-39. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 1993; 22(1-4): 253-6.
24. Vargas A, Ortega X. QA programme for radon and its short- lived progeny measuring instruments in nrpi prague. *Radiat Prot Dosimetry* 2007; 123:529-36.